Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT). Universidad Autónoma de Baja California ISSN 2594-1925
Volumen 9 (4): e515. Octubre-Diciembre, 2026. https://doi.org/10.37636/recit.v9n4e515

Estudio de casos

Factores ambientales y constructivos que promueven el deterioro prematuro de viviendas costeras de Veracruz, México

Environmental and Construction Factors that Promote Premature Deterioration of Coastal Housing in Veracruz, Mexico

Kenson Noel[1], David Reyes-González[1], Rodrigo Vivar-Ocampo[2]

[1]Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán Fracción l y ll SN, 73960 Teziutlán, Puebla, México

[2]Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Universitario 1000, Unidad Valle de Las Palmas, 22260 Tijuana, Baja California, México

Autor de correspondencia: David Reyes-González, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán Fracción l y ll SN, 73960 Teziutlán, Puebla, México. Correo electrónico: dreyesg@itsm.edu.mx. ORCID: 0000-0001-6400-5984.

Recibido: 24 de agosto del 2026 **Aceptado:** 22 de octubre del 2026 **Publicado**: 5 de noviembre del 2026

Resumen. - *El deterioro prematuro de estructuras de concreto reforzado en zonas costeras resulta de la acción combinada de la agresividad del ambiente marítimo y las deficiencias de la construcción informal. El presente trabajo identifica y cuantifica los factores determinantes del deterioro en viviendas de la costa central de Veracruz bajo la hipótesis de un modelo multicausal, a partir de un diagnóstico exploratorio en 65 estructuras ubicadas en ocho localidades costeras. Se aplicó un protocolo estandarizado que incluyó inspección visual, resistencia a compresión con esclerómetro, espesor de recubrimiento con vernier y profundidad de carbonatación con fenolftaleína. Para integrar las variables de deterioro en una métrica comparable, se construyó un Índice de Daño Compuesto (IDC, escala 1-10). Los resultados revelan una relación de decaimiento exponencial entre el IDC y la distancia al litoral: las estructuras a menos de 150 m registraron un IDC promedio de 8.23/10, frente a 1.51/10 en las ubicadas entre 500 y 948 m. No obstante, el 84.6% de las estructuras más alejadas presentó corrosión activa, confirmando que la distancia no protege cuando los recubrimientos son insuficientes. La profundidad media de carbonatación superó o igualó el espesor de recubrimiento en las cuatro zonas de exposición, con una brecha máxima de 2.1 cm en la zona más próxima al litoral y una convergencia exacta de ambos valores (2.4 cm) en la más alejada. La mampostería confinada resultó más vulnerable que el concreto reforzado monolítico, con 97.9% de castillos afectados frente a 61.5% de columnas. La autoconstrucción sin supervisión, el uso de agua de pozo sin verificación de calidad y el mantenimiento con mortero simple sobre acero corroído actúan como factores amplificadores del deterioro ambiental. Los resultados abren líneas de investigación orientadas al desarrollo de sistemas de protección alternativos, tales como recubrimientos a base de materiales cementantes suplementarios, pastas ecológicas de baja permeabilidad, etc., económicamente accesibles y compatibles con las condiciones de autoconstrucción prevalecientes en zonas costeras mexicanas.*

Palabras clave: Índice de daño compuesto (IDC); Mampostería confinada; Deterioro prematuro; Vivienda popular costera.

Abstract. - *The premature deterioration of reinforced concrete structures in coastal areas results from the combined action of the aggressiveness of the maritime environment and the deficiencies of informal construction. The present work identifies and quantifies the determining factors of deterioration in houses on the central coast of Veracruz under the hypothesis of a multicausal model, based on an exploratory diagnosis in 65 structures located in eight coastal localities. A standardized protocol was applied that included visual inspection, compressive strength with a sclerometer, coating thickness with a vernier caliper, and depth of carbonation with phenolphthalein. To integrate the deterioration variables into a comparable metric, the Compound Damage Index (CDI, scale 1-10) was constructed. The results reveal an exponential decay relationship between the IDC and the distance to the coast: structures less than 150 m registered an average IDC of 8.23/10, compared to 1.51/10 in those located between 500 and 948 m. However, 84.6% of the furthest structures presented active corrosion, confirming that distance does not protect when coatings are insufficient. The average carbonation depth exceeded or equaled the coating thickness in the four exposure zones, with a maximum gap of 2.1 cm in the area closest to the coast and an exact convergence of both values (2.4 cm) in the farthest zone. Confined masonry was more vulnerable than monolithic reinforced concrete, with 97.9% of castles affected compared to 61.5% of columns. Unsupervised self-construction, the use of well water without quality verification, and maintenance with simple mortar on corroded steel act as amplifying factors of environmental deterioration. The results open lines of research aimed at the development of alternative protection systems, such as base coatings, supplementary cementitious materials, ecological pastes with low permeability, etc., that are economically accessible and compatible with the conditions of self-construction prevailing in Mexican coastal areas.*

Keywords: Compound Damage Index (CDI); Confined masonry; Premature deterioration; Coastal popular housing.

ISSN: 2594-1925

1. Introducción

El deterioro de estructuras de concreto reforzado en ambientes costeros ha sido ampliamente estudiado como un proceso asociado principalmente a la penetración de cloruros y al avance de la carbonatación [1][2].

Estos mecanismos han sido modelados con éxito en condiciones controladas, considerando parámetros como mezclas diseñadas, recubrimientos conformes a norma y exposiciones ambientales estandarizadas. No obstante, dichos enfoques presentan limitaciones cuando se contrastan con las condiciones reales de la vivienda popular en economías emergentes, donde los supuestos de control técnico rara vez se cumplen. En contextos reales, particularmente en zonas costeras, el deterioro observado no responde a un único factor dominante, sino a la interacción simultánea de múltiples variables. En términos generales, pueden identificarse tres categorías principales: (i) la agresividad ambiental inherente al entorno marítimo; (ii) la vulnerabilidad asociada al sistema constructivo empleado; y (iii) las deficiencias derivadas de prácticas constructivas informales y mantenimiento inadecuado [1],[3]. A pesar de ello, gran parte de la literatura ha abordado estos factores de manera aislada, privilegiando análisis centrados exclusivamente en el ambiente de exposición o en propiedades del material, lo que limita la comprensión del fenómeno en condiciones reales de servicio.

La interacción entre estos factores puede generar tasas de deterioro significativamente superiores a las predichas por modelos que consideran únicamente variables ambientales o constructivas de forma independiente. En consecuencia, resulta fundamental avanzar hacia enfoques integrales que permitan identificar no solo la contribución individual de cada factor, sino también sus efectos combinados. Esto es relevante para el desarrollo de normativas diferenciadas y para la definición de estrategias de intervención en el parque de vivienda costera, donde los recursos disponibles suelen ser limitados.

Uno de los factores ambientales más relevantes en este contexto es la deposición de cloruros transportados por la brisa marítima, cuya intensidad disminuye con la distancia al litoral siguiendo un comportamiento que se asemeja a una tendencia aproximadamente exponencial [4]. En general, las zonas ubicadas a menos de 100-200 m del litoral se clasifican dentro de las categorías de mayor agresividad, caracterizadas por elevadas tasas de deposición de cloruros. Más allá de los 500 m, estas concentraciones pueden reducirse de forma significativa; no obstante, la reducción no sigue un patrón uniforme, pues depende de factores como la dirección y velocidad del viento, la topografía y la presencia de obstáculos físicos [5][6]. Por ello, la relación entre distancia al litoral y nivel de deterioro requiere ser evaluada empíricamente en cada contexto específico.

En la zona costera central del estado de Veracruz, las condiciones climáticas están dominadas por brisas marítimas persistentes con dirección predominante noreste [7], lo que favorece el transporte continuo de estas brisas hacia las superficies de las edificaciones y estructuras expuestas. Como consecuencia, la influencia del ambiente marítimo puede extenderse a distancias considerables del litoral, afectando estructuras ubicadas incluso a varios cientos de metros. Este comportamiento justifica el análisis de la distancia al mar como una variable explicativa clave en la distribución espacial del deterioro observado.
Desde el punto de vista constructivo, la mampostería confinada, siendo el sistema predominante en la vivienda popular mexicana, presenta una vulnerabilidad particular frente a la corrosión en ambientes marítimos. Sus elementos de confinamiento, como castillos y cadenas, suelen ejecutarse con secciones reducidas y recubrimientos mínimos que, en contextos de construcción informal, frecuentemente resultan

ISSN: 2594-1925

inferiores a los recomendados [8]. Además, su ubicación perimetral incrementa su exposición directa a agentes agresivos, lo que los convierte en los componentes más susceptibles al deterioro. Esta vulnerabilidad no solo afecta la durabilidad del material, sino que compromete el comportamiento estructural global.

A esta condición se suma la prevalencia de prácticas de autoconstrucción sin supervisión técnica, característica de la producción de vivienda en sectores de bajos recursos. En estos escenarios, parámetros críticos para la durabilidad del concreto tales como la relación agua-cemento, el espesor de recubrimiento, el proceso de curado y la calidad del agua de mezclado, quedan sujetos a decisiones empíricas, priorizando la reducción de costos sobre el desempeño a largo plazo. El resultado son estructuras con propiedades mecánicas aparentemente adecuadas, pero con alta permeabilidad y protección insuficiente del acero de refuerzo, lo que favorece la penetración de agentes agresivos y acelera los procesos de deterioro [9].
En este contexto, el deterioro prematuro no puede atribuirse exclusivamente a la agresividad del ambiente marítimo ni a deficiencias constructivas de forma aislada, sino a la interacción sinérgica entre ambos factores. Sin embargo, los estudios que abordan esta problemática desde una perspectiva integradora siguen siendo limitados, particularmente en regiones del Golfo de México, donde la evidencia empírica es aún escasa.

Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo es identificar y analizar los factores determinantes del deterioro prematuro en estructuras de vivienda popular en la zona costera central de Veracruz, a partir de un diagnóstico exploratorio in situ. Se plantea como hipótesis que el deterioro observado es resultado de la interacción multiplicadora entre la agresividad ambiental marítima modulada por la distancia al litoral y las deficiencias constructivas y tipológicas asociadas a la autoconstrucción, y no de la acción independiente de estos factores.

2. Metodología

La inspección de campo se realizó en septiembre de 2022 en ocho localidades contiguas de la franja costera central del estado de Veracruz, México: El Laurel (20°07'06.91" N, 96°40'58.08" O), El Raudal (20°09'24.40" N, 96°43'09.53" O), Barra de Palmas (20°09'44.90" N, 96°43'32.69" O), Nautla (20°12'31.12" N, 96°46'26.61" O), Casitas (20°15'25.77" N, 96°48'03.29" O), Monte Gordo (20°17'38.13" N, 96°50'20.44" O), La Vigueta (20°20'08.20" N, 96°52'49.85" O) y La Guadalupe (20°22'20.62" N, 96°55'04.00" O). Las coordenadas (datum WGS84) se determinaron mediante geolocalización retrospectiva de escritorio sobre imágenes satelitales en Google Earth Pro (Figura 1), por lo que su precisión horizontal es de unos pocos metros y no corresponde a un levantamiento GPS de campo. Estas localidades fueron seleccionadas por su representatividad dentro del corredor costero y por presentar condiciones típicas de vivienda popular expuesta a atmósferas marítimas.

La temperatura y la humedad relativa ambiente se registraron in situ con un termohigrómetro digital portátil modelo HTC1 (temperatura: -10 a +50 °C, resolución 0.1 °C, precisión ±1 °C; humedad relativa: 10 a 99 %, resolución 1 % HR), mantenido a la sombra con los sensores expuestos al aire ambiente. En cada localidad se tomaron nueve lecturas, una cada 30 min durante un periodo de 4 h, de forma simultánea a la inspección visual de las estructuras deterioradas. Las temperaturas registradas variaron entre 23.6 y 34.3 °C (promedio general de 27.9 ± 2.5 °C), con promedios por localidad de 26.3 a 30.1 °C; la humedad relativa, redondeada a la resolución nominal del instrumento (1 % HR), varió entre 68 y 82 % (promedio

ISSN: 2594-1925

general de 76 ± 4 %), con promedios por localidad de 74 a 77 %. Estas variables no se establecieron como condición experimental, sino que se registraron como condiciones ambientales prevalecientes durante la inspección, debido a que la temperatura y la humedad relativa determinan el tiempo de humectación de las superficies, la cinética de corrosión del acero de refuerzo y el transporte y depósito de cloruros en atmósferas marítimas [10][11]. Se observó que los promedios por localidad se ubicaron por debajo del umbral de 80 % HR, aunque 11 de las 72 lecturas individuales lo superaron (máximo de 82 %).

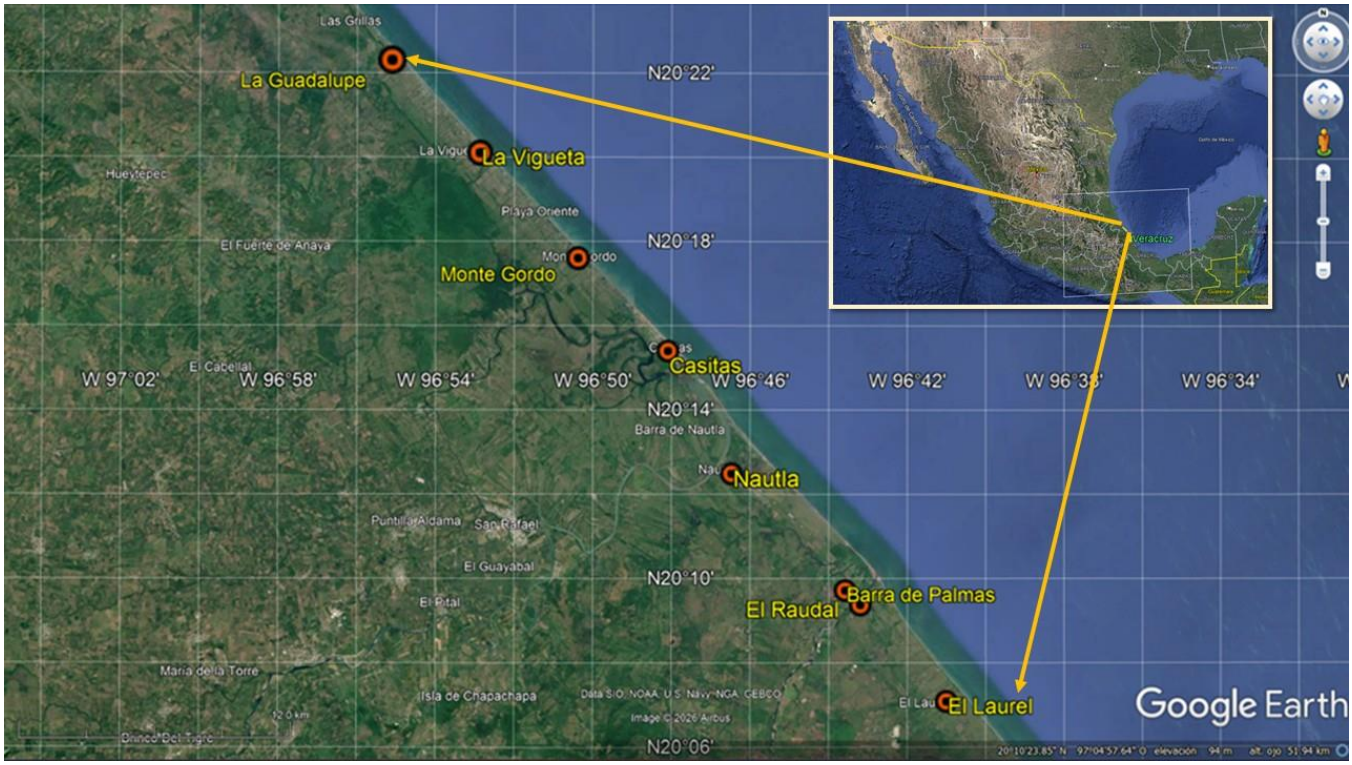


Figura 1. Localización de las ocho localidades costeras, en el estado Veracruz, México.

El criterio de selección de localidades se basó en un reconocimiento cualitativo de campo, en el que se identificaron las zonas donde un mayor número de viviendas presentaba indicadores de daño asociados a corrosión tales como manchas de óxido, fisuración inducida por corrosión, desprendimiento del recubrimiento o acero expuesto, conforme a los indicadores empleados en el Manual DURAR [12]. Se consideró “deterioro visible” la presencia de al menos uno de estos indicadores en la estructura. En este contexto, las localidades de Nautla y La Vigueta concentraron el mayor número de estructuras con deterioro visible, con 23 y 17 casos, respectivamente, lo que evidencia una mayor incidencia de patologías en comparación con el resto de las localidades evaluadas.

Adicionalmente, la selección consideró la distribución espacial de las viviendas respecto al litoral, con el objetivo de capturar variaciones en la exposición a la brisa marítima y su influencia en los mecanismos de deterioro. Las localidades abarcan un gradiente de distancia al mar comprendido entre 30 m y 948 m en línea horizontal, bajo condiciones climáticas y tipológicas relativamente homogéneas, lo que permite analizar la distancia al litoral como variable explicativa del deterioro con un control razonable de factores de confusión.

ISSN: 2594-1925

Se inspeccionaron 65 estructuras que presentaban al menos un síntoma visible de deterioro asociado a corrosión [12]. Para cada estructura, la distancia horizontal al litoral fue determinada mediante un medidor GNSS portátil (Asixxsix, modelo S3; precisión de posición ± 2.5 m; precisión de distancia ± 1 m dentro de 100 m). Las coordenadas de las ocho localidades, en cambio, se determinaron por geolocalización de escritorio ya descrito en el apartado anterior.

2.1. Determinación de los Índices de Daños Compuestos (IDC)

El IDC de cada estructura se asignó de forma cualitativa mediante inspección visual, a partir de cuatro indicadores de daño asociados a la corrosión de las estructuras reforzadas que fueron tomados en cuenta durante la inspección, conforme a la lógica de niveles de daño del Manual DURAR [12]. La asignación cuantitativa de IDC de cada estructura fue realizada por los autores con conocimiento de la distancia de cada estructura al litoral, por lo que constituye una clasificación subjetiva y no un índice calculado a partir de mediciones.

Los cuatro indicadores fueron principalmente: (i) número de anomalías visuales presentes (de un total de 5 posibles); (ii) porcentaje de elementos estructurales afectados; (iii) relación carbonatación/recubrimiento (indicador de riesgo de despasivación); y (iv) reducción estimada de sección de la armadura. Estos cuatro componentes replican a escala de vivienda, los indicadores de daño definidos en el Manual DURAR: manchas de óxido, fisuras, desprendimiento del recubrimiento y pérdida de sección del acero [12].

La escala se normalizó de modo que IDC = 1 corresponde a deterioro mínimo y IDC = 10 a deterioro generalizado severo con exposición extensa de armadura, la Figura 2 presenta visualmente algunas de las estructuras más críticas que permitieron categorizar el índice de daño compuesto.

Con base en lo anterior, las estructuras se agruparon en cuatro zonas de exposición según su proximidad al litoral: Zona I (< 150 m), Zona II (150–350 m), Zona III (350–500 m) y Zona IV (500–948 m), en correspondencia con los gradientes de agresividad atmosférica marítima reportados en la literatura [13][14].

ISSN: 2594-1925



Figura 2. Observación visual sobre la variación del daño en función de la distancia al mar.

Los ensayos en sitio realizados fueron los siguientes:

Resistencia a compresión. Esclerómetro analógico tipo N (martillo Schmidt, ASTM C805); energía de impacto 2.207 N·m. En cada estructura se definió una sección de ensayo de 30×30 cm, subdividida en una retícula de 10 cm, sobre la cual se realizaron 9 lecturas de rebote (índice esclerométrico); se eliminaron lecturas con desviación > 5 unidades respecto al promedio del grupo.

Espesor de recubrimiento. Calibrador vernier digital (resolución 0.2 mm, DIN 862 / NMX-CH-002-IMNC-2004), medido en la interfaz acero-concreto expuesta por fractura natural del recubrimiento.
Profundidad de carbonatación. Solución de fenolftaleína en aerosol sobre sección transversal expuesta; zona sin viraje de color (pH < 9) medida con vernier [15].

Las 65 estructuras se clasificaron en dos grupos: mampostería confinada (MC, n = 49) y concreto reforzado monolítico (CR, n = 16). Para cada grupo se calcularon los indicadores de deterioro visual, recubrimiento y carbonatación con base en los indicadores de [12] y en los procedimientos de ensayo descritos arriba. Adicionalmente, se registró el diámetro del acero de refuerzo predominante mediante inspección visual de secciones expuestas.

ISSN: 2594-1925

Los factores constructivos se levantaron mediante un cuestionario estructurado de inspección visual, aplicado a propietarios, trabajadores de obra y distribuidores de materiales locales, complementado con observación directa durante la inspección. Se registraron: origen del agua de mezclado, tipo y marca del cemento, tipo de agregados finos y gruesos, diámetro del acero, y práctica de mantenimiento empleada principalmente.

Las principales limitaciones son: (a) el tamaño de muestra fue determinado por conveniencia, lo que restringe la generalización estadística; (b) el IDC es un índice compuesto con ponderación igual para sus componentes, sin una validación psicométrica formal; (c) la distancia al litoral se midió como distancia horizontal en línea recta, sin considerar la topografía ni la dirección del viento dominante; (d) no se realizaron ensayos de contenido de cloruros por perfil de profundidad ni de velocidad de corrosión electroquímica; y (e) el diagnóstico es transversal, sin seguimiento longitudinal.

3. Resultados y Discusiones

3.1. Relación entre la distancia al litoral y el índice de deterioro compuesto

La evaluación de la relación entre la distancia al litoral marítimo y el índice de deterioro compuesto (IDC) se realizó mediante un diagrama de dispersión y el ajuste de una función de regresión exponencial decreciente (Figura 3). La incorporación de este análisis responde a la necesidad de evaluar cuantitativamente si la distribución espacial del deterioro de las viviendas presenta un patrón compatible con la atenuación de la exposición a los agentes agresivos de origen marítimo. De acuerdo con [16], esta aproximación es pertinente porque la distancia a la línea de costa representa una variable espacial indirecta de la exposición a las brisas marítimas, cuya deposición sobre las superficies expuestas tiende a disminuir hacia el interior del territorio. Sin embargo, la magnitud de este gradiente también depende de las condiciones meteorológicas, la configuración del terreno, las barreras físicas y las características de las propias estructuras [17] .

Es necesario aclarar que, dado que la variable respuesta del presente estudio es el IDC y no una medición directa de la deposición de cloruros, el modelo se utiliza para caracterizar el patrón espacial del deterioro observado, sin asumir que ambas variables presentan necesariamente una relación funcional idéntica.

De las 65 estructuras inspeccionadas, 62 (95.4%) son viviendas unifamiliares, y 3 (4.6%) son muros de contención, correspondientes a cercos perimetrales frontales de viviendas de la propia muestra, incluidos en el análisis porque incorporan elementos reforzados (castillos y cadenas) expuestos a la misma brisa marítima y sujetos a los mismos factores ambientales y constructivos que las viviendas; el 90.8% de las viviendas se encontraba habitado al momento de la inspección. Por sistema constructivo: 49 (75.4%) son de mampostería confinada y 16 (24.6%) de concreto reforzado monolítico. Por zona de exposición: 18 estructuras en Zona I (< 150 m), 20 en Zona II (150–350 m), 14 en Zona III (350–500 m) y 13 en Zona IV (500–948 m).

El IDC final de cada estructura corresponde al promedio aritmético de los cuatro componentes normalizados, acotado al intervalo [1,10]. La Figura 3 muestra la dispersión de los 65 casos respecto al índice de daño compuesto.

ISSN: 2594-1925

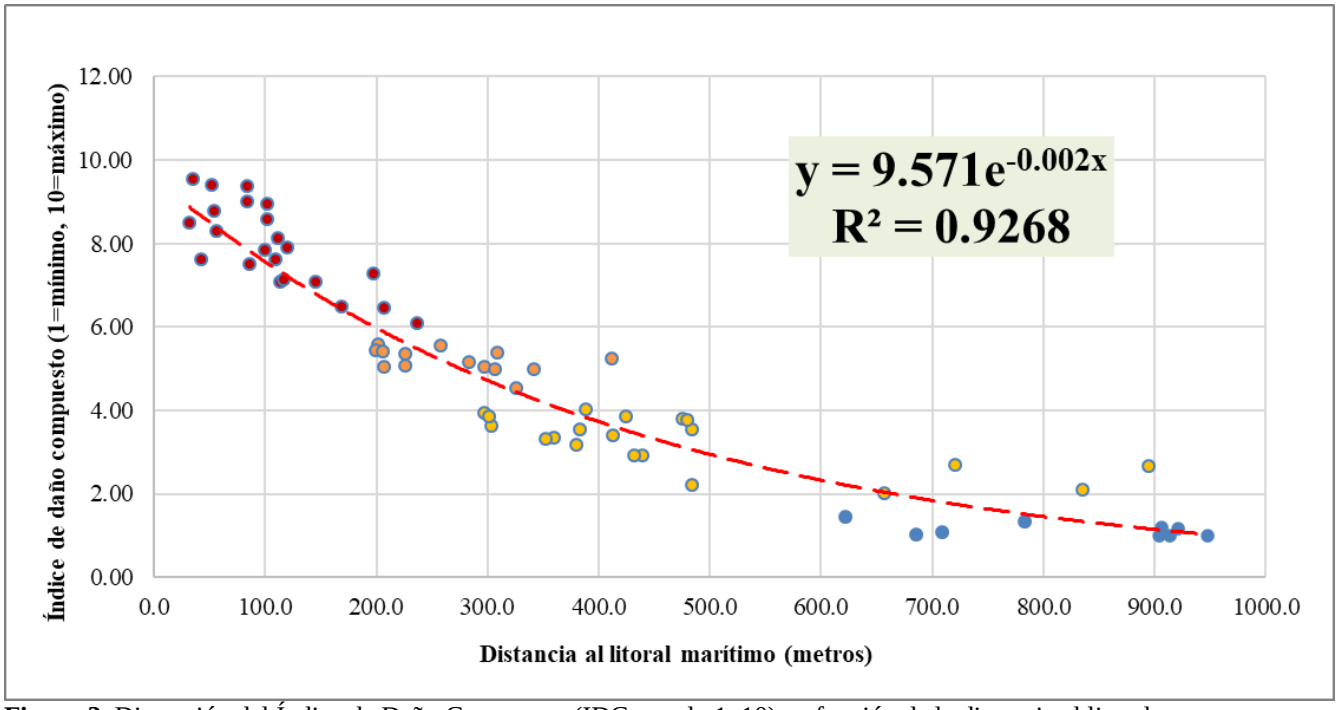


Figura 3. Dispersión del Índice de Daño Compuesto (IDC, escala 1–10) en función de la distancia al litoral.

La distribución espacial de los puntos observados en el diagrama de dispersión de la Figura 3 revela tres patrones claramente diferenciables. En la franja de 0 a 150 m del litoral, la totalidad de las estructuras registró valores de IDC superiores a 6.0, concentrándose en el rango 6.2-9.8, lo que las ubica en la categoría crítica. Entre los 150 y 500 m, la nube de puntos presenta mayor dispersión vertical, con estructuras que coexisten en los niveles alto y moderado dentro de un mismo rango de distancia; más allá de los 500 m, los valores de IDC convergen hacia el rango bajo (1-3.49), con escasa dispersión entre estructuras, lo que sugiere que a esta distancia la deposición de cloruros ha disminuido lo suficiente para que el factor ambiental marítimo deje de ser el determinante primario del deterioro, cediendo protagonismo a los factores constructivos como el recubrimiento insuficiente y el uso de agua de pozo.

La pendiente pronunciada de la curva con tendencia exponencial en los primeros 200 m, donde el IDC cae de aproximadamente 9.0 a 6.2, contrasta con la estabilización progresiva observada más allá de los 500 m, comportamiento que reproduce exactamente el patrón de decaimiento rápido en la franja inmediata al litoral seguido de una atenuación gradual documentado en zonas costeras [4]. Es necesario aclarar que, dado que la clasificación fue subjetiva y no ciega respecto a la distancia, esta tendencia debe interpretarse como una observación exploratoria y no como evidencia de una relación causal o de un modelo de decaimiento.

El ajuste obtenido en la Figura 3 se expresa mediante la ecuación $\widehat{IDC}=9.571\times e^{-0.002x}$, donde (x) representa la distancia al litoral en metros y $\widehat{IDC}$ corresponde al valor estimado del índice. El coeficiente exponencial negativo indica una asociación decreciente entre ambas variables dentro del intervalo estudiado. El valor de ($R^2=0.9268$) reportado en la figura indica que el modelo presenta un elevado grado de ajuste a los datos observados, al explicar aproximadamente el 92.68 % de su variabilidad. Este resultado respalda la utilidad descriptiva del modelo para resumir la tendencia general de la muestra; sin embargo, por sí solo no

ISSN: 2594-1925

demuestra causalidad, no establece significación estadística y tampoco garantiza capacidad predictiva fuera del conjunto de viviendas evaluado. El parámetro de decaimiento estimado (0.002), caracteriza la rapidez con que disminuye el valor predicho por la función ajustada. Este resultado describe la escala espacial de la curva ajustada, pero no debe interpretarse como una distancia límite a partir de la cual desaparecen los cloruros o cesa la influencia del ambiente marítimo. ambientales y constructivas.

En conjunto, el análisis de la relación del deterioro respecto a la distancia al litoral proporciona una representación cuantitativa del gradiente espacial del deterioro y permite formular una hipótesis de trabajo sobre la influencia de la exposición marítima en las viviendas estudiadas. Su principal contribución consiste en identificar un patrón general de disminución del IDC con la distancia y establecer una base para contrastarlo con mediciones independientes de deposición de cloruros y variables constructivas, dado que el ajuste por sí solo no controla los posibles factores de confusión, los resultados deben interpretarse como evidencia exploratoria de asociación y no como demostración de una relación causal.

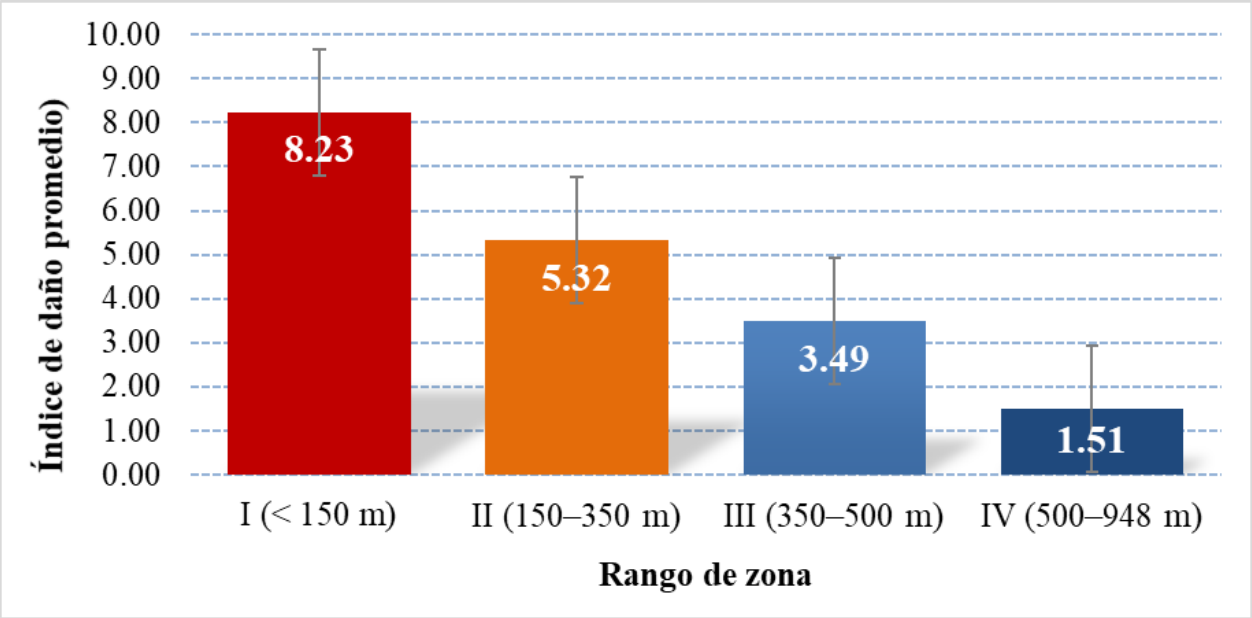


Figura 4. Índice de Daño Compuesto promedio por zona de distancia al litoral.

El análisis del Índice de Daño Compuesto (IDC) por zona de exposición revela un gradiente de deterioro consistente con la disminución exponencial de la agresividad atmosférica marina en función de la distancia al litoral (Figura 4). Las estructuras de la Zona I presentaron el IDC promedio más elevado de la muestra (8.23/10), indicativo de deterioro generalizado severo con exposición extensa de armadura, reducción significativa de sección transversal y desmoronamiento avanzado del recubrimiento en prácticamente la totalidad de los elementos inspeccionados.

La Zona II registró un IDC promedio de 5.32/10, lo que representa una reducción del 35.4% respecto a la Zona I. Aunque el nivel de deterioro continúa siendo clasificable como alto, con corrosión activa presente en la totalidad de las estructuras de esta zona.

ISSN: 2594-1925

La Zona III presentó un IDC promedio de 3.49/10, equivalente a una reducción acumulada del 57.6% respecto a la Zona I. A esta distancia, el gradiente de decaimiento comienza a estabilizarse, comportamiento también reportado por [18].

Finalmente, las estructuras de la Zona IV registraron el IDC promedio más bajo de la muestra (1.51/10), con una reducción del 81.7% respecto a la Zona I. Sin embargo, este valor no debe interpretarse como ausencia de riesgo: un IDC de 1.51 indica deterioro incipiente con presencia de manchas de óxido y microfisuras en los recubrimientos, lo que confirma que la influencia de la atmósfera marítima agresiva se extiende más allá de los 600 m del litoral en la zona de estudio, en presencia de recubrimientos insuficientes. Esta observación es congruente con lo señalado por [10], quienes documentaron deposición de cloruros atmosféricos con capacidad corrosiva activa a distancias superiores a 500 m en zonas costeras tropicales con vientos predominantes de componente marítima.

Tabla 1. Indicadores de deterioro por zona de distancia al litoral (n = 65 estructuras).

Zona	Distancia	n	Corrosión activa (%)	Recubrimiento prom. (cm)	Prof. carbonat. (cm)
I	< 150 m	18	100%	1.4	3.5
II	150–350 m	20	100%	1.7	3.2
III	350–500 m	14	100%	1.9	2.9
IV	500–948 m	13	84.6%	2.4	2.4

Lo más crítico observado en la tabla 1 es la relación entre la profundidad de carbonatación y el espesor de recubrimiento en cada zona de exposición, en donde la profundidad de carbonatación rebase el espesor de recubrimiento de los elementos estructurales de las viviendas.

En la Zona I (< 150 m), el frente de carbonatación promedio (3.5 cm) supera el recubrimiento promedio (1.4 cm) en 2.1 cm, lo que implica que el acero de refuerzo no solo ha perdido su protección alcalina, sino que lleva un tiempo indeterminado expuesto a un medio con pH inferior al umbral de pasivación (~9.5), condición que explica la corrosión activa generalizada observada en el 100% de las estructuras de esta zona. Esto disminuye progresivamente con la diferencia de 1.5 cm en Zona II, 1.0 cm en Zona III, pero no desaparece en ninguna de las cuatro zonas: incluso en la Zona IV el promedio de profundidad de carbonatación iguala exactamente al promedio de recubrimiento (2.4 cm), lo que indica que, en promedio, el frente de carbonatación ha alcanzado la profundidad del acero. Sin embargo, el promedio zonal oculta una variabilidad importante: la mayoría de las viviendas inspeccionadas, en las cuatro zonas, presentan recubrimientos individuales inferiores a 2 cm por debajo de los mínimos normativos mexicanos, por lo que el riesgo de despasivación no se limita a la Zona I ni desaparece en la Zona IV, sino que persiste a nivel de estructura individual en todo el rango de distancias estudiado. Este resultado es congruente con lo reportado por [2], quienes documentaron que recubrimientos inferiores a 2.5 cm en ambientes con carbonatación activa son insuficientes para garantizar la pasividad del acero en plazos superiores a 10 años.

Asimismo, cabe resaltar que, incluso el valor más alto registrado (2.4 cm en promedio en Zona IV) representa apenas el 60% del recubrimiento mínimo del ACI 318-19 (Sección 20.6.1.3.1) para concreto colado en obra expuesto a la intemperie con barras del No. 6 al No. 18 (50 mm), y equivale al mínimo

ISSN: 2594-1925

establecido para barras menores expuestas a la intemperie (40 mm). Esto muestra que el déficit de recubrimiento no es un fenómeno localizado ni aleatorio, sino una condición estructural del modo de construcción de vivienda prevaleciente en la región, lo cual es la autoconstrucción sin supervisión técnica, que replica de forma consistente recubrimientos insuficientes independientemente de la distancia al litoral. La Figura 5 compara los principales indicadores de deterioro entre los dos sistemas constructivos identificados en la muestra.

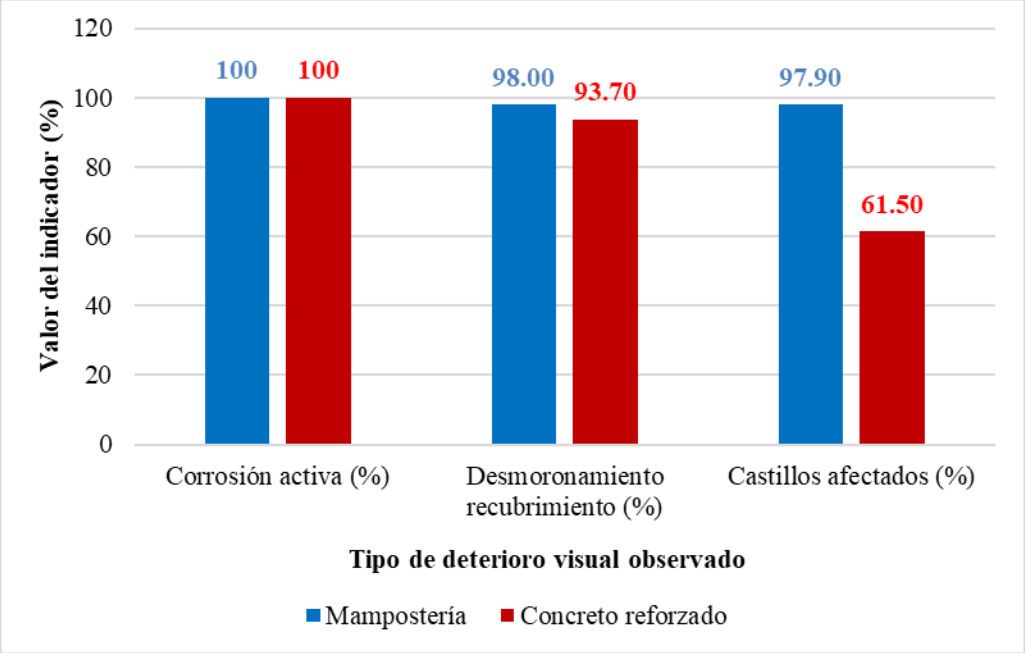


Figura 5. Comparativa de indicadores de deterioro entre mampostería confinada (n = 49) y concreto reforzado monolítico (n = 16).

La mampostería confinada mostró mayor severidad en todos los indicadores de daño visual, con especial énfasis en el porcentaje de castillos y cadenas afectados (97.9%) frente al porcentaje de columnas de marcos de concreto dañadas (61.5%). Esta diferencia se explica por factores tipológicos y de ejecución: los castillos y cadenas de la mampostería confinada tienen secciones transversales de menor espesor, típicamente 10×10 cm, y se ejecutan frecuentemente con cimbras improvisadas que no garantizan el recubrimiento mínimo. Su posición perimetral los expone directamente a la intemperie, a diferencia de las columnas de marcos de concreto, que en algunos casos quedan protegidas por acabados o cerramientos. Adicionalmente, la mampostería confinada es el sistema constructivo de menor costo y más ampliamente utilizado en la autoconstrucción informal de la zona, lo que implica que es también el que concentra las mayores deficiencias en calidad de materiales y ejecución.

La Figura 6 ilustra la distribución del daño por tipo de elemento estructural en el total de las 65 estructuras inspeccionadas. Los resultados revelan una jerarquía de vulnerabilidad que no es aleatoria, sino que responde a factores tipológicos, geométricos y de ejecución específicos de cada elemento.

ISSN: 2594-1925

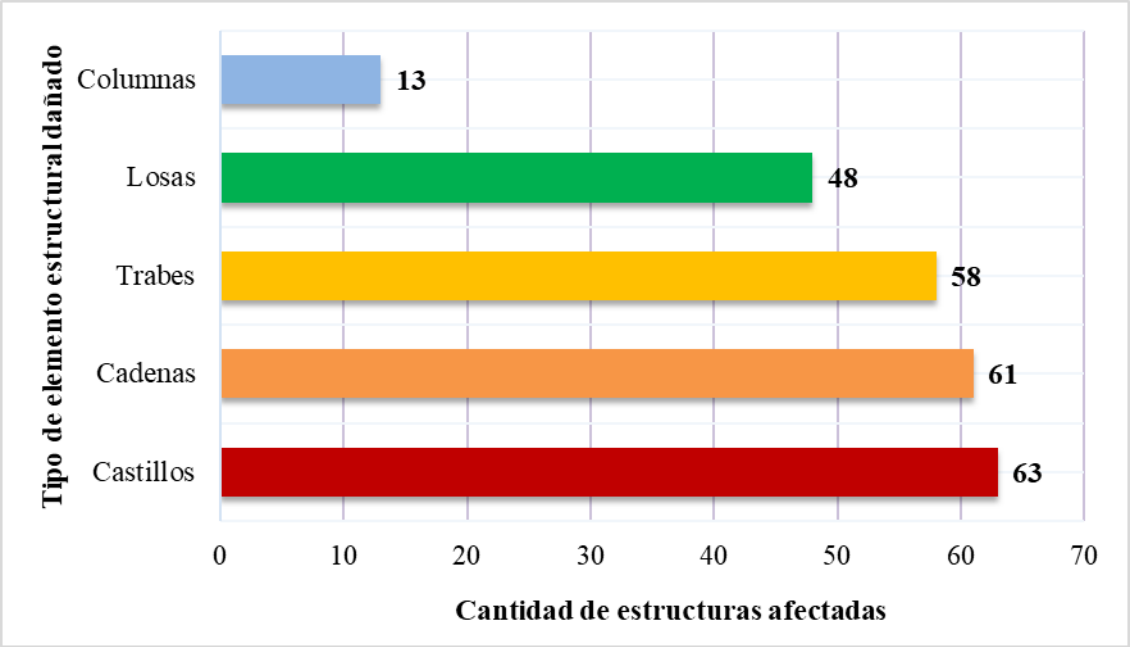


Figura 6. Distribución del daño por elemento estructural en el total de la muestra (n = 65 estructuras).

Los castillos y las cadenas concentran la mayor incidencia de daño, con 63 (96.9%) y 61 (93.8%) estructuras afectadas respectivamente, valores que los posicionan como los elementos más vulnerables del sistema de mampostería confinada ante la agresividad de la atmósfera marítima. Esta elevada incidencia tiene una explicación técnica multifactorial. En primer lugar, los castillos y cadenas son elementos de sección transversal reducida, típicamente 10×10 cm o 15×15 cm en la construcción popular de la región, que se ejecutan con cimbras improvisadas, lo que sistemáticamente produce recubrimientos inferiores a los mínimos normativos (ACI 318-19). En segundo lugar, su posición perimetral en la estructura los expone directamente a las brisas marítimas, la humedad y los ciclos de humectación-secado sin la protección que pueden ofrecer los acabados interiores de los muros. En tercer lugar, al ser los primeros elementos en recibir la carga del viento marítimo cargado de cloruros, acumulan mayor deposición salina por unidad de superficie que los elementos interiores o protegidos [17].

La combinación de estos tres factores, siendo geometría reducida, posición expuesta y ejecución deficiente, configura una vulnerabilidad estructural inherente al sistema de mampostería confinada en estos entornos marítimos.

Las trabes presentaron daño en 58 estructuras (89.2%), valor elevado que refleja su posición horizontal expuesta, frecuentemente en la parte superior de vanos de puertas y ventanas, donde la acumulación de agua de lluvia contaminada con cloruros favorece los ciclos de humectación prolongada y la penetración acelerada del frente de carbonatación. Su incidencia ligeramente menor respecto a castillos y cadenas puede atribuirse a que en algunas viviendas las trabes quedan parcialmente protegidas por aleros o voladizos que reducen la exposición directa a la lluvia y la brisa marítima [19].

ISSN: 2594-1925

Las losas registraron daño en 48 estructuras (73.8%), constituyendo el elemento horizontal con menor incidencia de daño relativo dentro del grupo de alta afectación. Su mayor espesor respecto a castillos y cadenas, típicamente entre 8 y 12 cm en la construcción popular, ofrece una mayor reserva de recubrimiento que retarda, aunque no impide, la llegada del frente de carbonatación al acero. No obstante, las losas presentan una patología particular asociada a la acumulación de agua estancada en su cara superior cuando el drenaje es deficiente, condición que puede incrementar localmente el tiempo de humectación y favorece la penetración de cloruros en puntos específicos, generando patrones de corrosión localizada que pueden ser más difíciles de detectar visualmente que la corrosión generalizada de castillos y cadenas [20].

En conjunto, la distribución del daño por elemento estructural confirma que la mampostería confinada y en particular sus elementos de confinamiento vertical y horizontal, concentra el mayor riesgo estructural en el entorno marítimo estudiado, con implicaciones sobre el costo de rehabilitación, dado que castillos y cadenas son los elementos de mayor densidad en este sistema constructivo y su rehabilitación integral requiere intervenciones extensas en prácticamente la totalidad de la envolvente estructural de la vivienda.

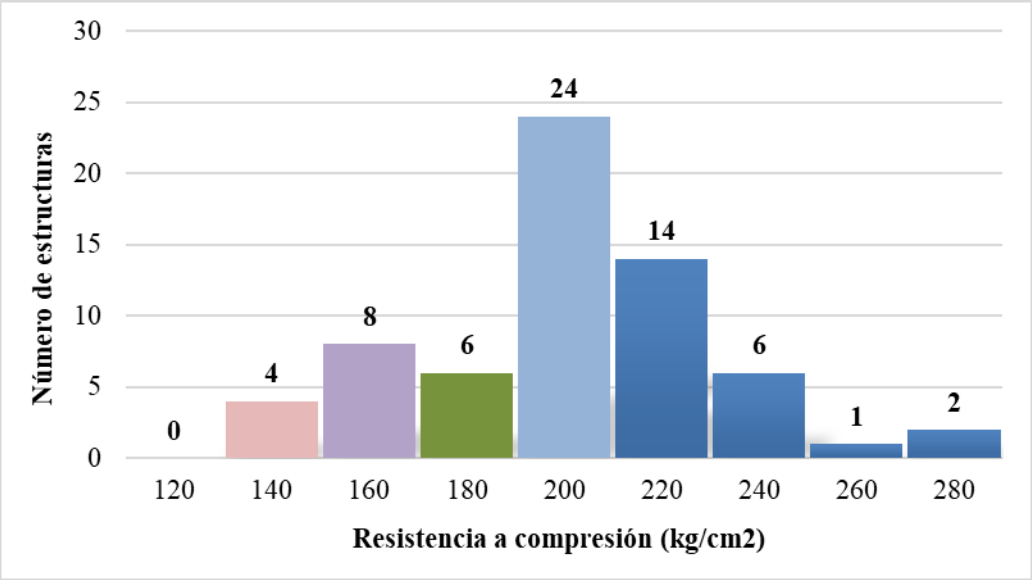


Figura 7. Distribución de frecuencias de la resistencia a compresión en las 65 estructuras inspeccionadas.

La distribución de frecuencias de la resistencia a compresión obtenida mediante esclerometría [21] en las 65 viviendas inspeccionadas muestra una concentración predominante en el rango de 180 a 220 kg/cm², que agrupa el 67.7% de la muestra (44 viviendas). El intervalo modal corresponde a 200 kg/cm² con 24 viviendas (36.9%), resistencia comúnmente especificada como clase de referencia para concreto de uso habitacional en México [22]. Se registraron 4 viviendas (6.2%) por debajo de este umbral (140 y 160 kg/cm²), lo que indica un cumplimiento aparente del 93.8% en términos de resistencia media.

Sin embargo, este aparente cumplimiento contrasta radicalmente con la evidencia de corrosión activa presente en el 100% de las estructuras, lo que confirma que la resistencia mecánica no es un predictor suficiente de la durabilidad en ambientes marítimos agresivos [23][24]. La asimetría positiva de la distribución (cola hacia resistencias superiores: 6 viviendas por encima de 220 kg/cm², con máximos de

ISSN: 2594-1925

260 y 280 kg/cm²) refleja la heterogeneidad constructiva típica de la autoconstrucción sin control de calidad.

Por lo tanto, La relación exponencial decreciente entre distancia al litoral e índice de daño (Figuras E y F) es coherente con los modelos de deposición de aerosoles marinos reportados en la literatura [4],[25]. La reducción del 81.7% en el IDC entre Zona I (< 150 m) y Zona IV (500–948 m) confirma que la franja de los primeros 150–200 m es la zona de máxima agresividad. Sin embargo, el dato de que el 84.6% de las estructuras en Zona IV (500–948 m) presentó corrosión activa indica que la influencia marítima no se limita a las inmediaciones del litoral, sino que se extiende a distancias considerables cuando los recubrimientos son insuficientes y las mezclas son permeables. Este resultado observado tiene implicaciones normativas directas: las especificaciones constructivas para zonas marítimas no deberían limitarse a la franja inmediata al litoral, sino extenderse a una banda mínima de 500-1000 m.

La diferencia de 36.4 puntos porcentuales en el daño a elementos de confinamiento entre mampostería y concreto reforzado (97.9% vs. 61.5%, Figura 3) no puede atribuirse exclusivamente al sistema constructivo, sino a la combinación de tipología, ejecución informal y posición de los elementos. Los castillos y cadenas de la mampostería confinada concentran las mayores deficiencias de recubrimiento (media: 1.6 cm vs. 2.4 cm en concreto reforzado) y la mayor profundidad de carbonatación (3.2 cm vs. 2.6 cm), resultando en una brecha carbonatación-recubrimiento de 1.6 cm en mampostería frente a 0.2 cm en concreto reforzado, lo cual es una diferencia de 1.4 cm que implica que en la mampostería el acero está completamente desprotegido frente a la carbonatación, mientras que en el concreto reforzado la situación, aunque preocupante, es marginalmente mejor.

Este resultado tiene implicaciones importantes para la gestión del riesgo de vivienda costera: la mampostería confinada, que es el sistema de mayor difusión en la vivienda popular mexicana precisamente por su menor costo relativo, resulta ser el de mayor vulnerabilidad ante la corrosión en entornos marítimos, lo que genera una paradoja socioeconómica: los hogares con menores recursos económicos construyen con el sistema más susceptible al deterioro en el entorno donde residen, incrementando su exposición al riesgo estructural y al costo de rehabilitación a mediano plazo.

4. Conclusiones

El diagnóstico exploratorio realizado en 65 estructuras de vivienda popular ubicadas en la franja costera central de Veracruz permite establecer las siguientes conclusiones:

• El deterioro prematuro documentado responde a un modelo multicausal en el que interactúan de forma sinérgica tres categorías de factores: la agresividad del ambiente marítimo modulada por la distancia al litoral, la vulnerabilidad tipológica inherente a la mampostería confinada, y las deficiencias derivadas de la construcción informal y el mantenimiento incorrecto. Ninguno de estos factores, de forma aislada, explica la severidad del deterioro observado; es su interacción la que configura el escenario de deterioro acelerado documentado.
• La distancia al litoral actúa como modulador primario de la agresividad ambiental con un comportamiento de decaimiento exponencial: las estructuras ubicadas a menos de 150 m del litoral registraron un IDC promedio de 8.23/10, frente a 1.51/10 en las ubicadas entre 500 y 948 m, una reducción del 81.7%. No obstante, el 84.6% de las estructuras en la zona más alejada presentó corrosión activa,

ISSN: 2594-1925

evidenciando que la influencia de la atmósfera marítima agresiva se extiende más allá de los 600 m cuando los recubrimientos son sistemáticamente insuficientes, lo que sustenta la necesidad de extender las especificaciones normativas de durabilidad para zonas marítimas a una banda mínima de 500 a 1000 m del litoral.

• La mampostería confinada resultó ser el sistema constructivo más vulnerable en este entorno: el porcentaje de elementos de confinamiento afectados supera al registrado en columnas de concreto reforzado monolítico (61.5%), lo que evidencia que los hogares con menor capacidad económica construyen, en mayor proporción, con el sistema estructural más vulnerable al deterioro por corrosión.

• En ninguna de las cuatro zonas de exposición estudiadas el recubrimiento promedio fue suficiente para mantener el acero en zona alcalina protegida: la profundidad de carbonatación superó el espesor de recubrimiento en todas las zonas, con una brecha máxima de 2.1 cm en la Zona I y una convergencia exacta en la Zona IV (ambos: 2.4 cm), donde el frente de carbonatación ha alcanzado precisamente la profundidad del acero. El recubrimiento promedio general de 1.8 cm representa apenas el 45% del mínimo del ACI 318-19 para concreto colado en obra expuesto a la intemperie con barras del No. 6 al No. 18 (50 mm), constituyendo el factor técnico de mayor impacto sobre la durabilidad de las estructuras estudiadas.

• La resistencia a compresión promedio de 200-220 kg/cm², dentro de la clase de referencia comúnmente especificada para vivienda según NMX-C-155-ONNCCE, demuestra empíricamente que la resistencia mecánica no es un predictor suficiente de durabilidad en ambientes marítimos agresivos, puesto que en la mayoría de las estructuras inspeccionadas hubo deterioro de la estructura reforzada.

Las prácticas constructivas informales identificadas, tales como uso de agua de pozo sin verificación de calidad y mantenimiento con mortero simple sobre acero en corrosión activa, actúan como factores amplificadores del deterioro ambiental, produciendo niveles severos de daño en edades tempranas, frente a los 50 o más años de vida útil esperada bajo condiciones normativas.

Estos resultados son, en general, congruentes con la hipótesis de partida de un modelo multicausal de deterioro, aunque el estudio tiene limitaciones que abren líneas de trabajo futuro: el diagnóstico es de carácter exploratorio y no incluyó ensayos de cloruros ni de velocidad de corrosión electroquímica, por lo que futuras etapas de esta investigación deberán incorporar dichas mediciones para cuantificar directamente el riesgo de despasivación; asimismo, ampliar la muestra a otras localidades de la costa central de Veracruz y dar seguimiento longitudinal a un subconjunto de estructuras permitiría validar la relación de decaimiento exponencial encontrada entre el IDC y la distancia al litoral, y evaluar la efectividad de los sistemas de protección alternativos propuestos.

5. Reconocimiento de autoría

Kenson Noel: Conceptualización; Metodología; Investigación; Análisis formal; Análisis de datos; Borrador original. *David Reyes-González*: Conceptualización, Metodología; Investigación; Escritura; Revisión y edición. *Rodrigo Vivar-Ocampo*: Conceptualización; Escritura; Revisión y edición.

ISSN: 2594-1925

Referencias

[1] L. F. Rincon, Y. M. Moscoso, A. E. A. Hamami, J. C. Matos, and E. Bastidas-Arteaga, "Degradation Models and Maintenance Strategies for Reinforced Concrete Structures in Coastal Environments under Climate Change: A Review," Buildings, vol. 14, no. 3, p. 562, Feb. 2024, doi: 10.3390/buildings14030562.

[2] A. F. Al Fuhaid and A. Niaz, "Carbonation and Corrosion Problems in Reinforced Concrete Structures," Buildings, vol. 12, no. 5, p. 586, May 2022, doi: 10.3390/buildings12050586.

[3] M. Terrados-Cristos, M. Diaz-Piloneta, F. Ortega-Fernández, G. M. Martinez-Huerta, and J. V. Alvarez-Cabal, "Corrosion Risk Assessment in Coastal Environments Using Machine Learning-Based Predictive Models," Sensors, vol. 25, no. 13, p. 4231, Jul. 2025, doi: 10.3390/s25134231.

[4] Y. M. Panchenko, A. I. Marshakov, L. A. Kudryavtseva, V. V. Kovtanyuk, and T. A. Nenasheva, "A chloride deposition model for predicting the categories of atmospheric corrosivity in coastal areas," Corrosion Engineering, Science and Technology: The International Journal of Corrosion Processes and Corrosion Control, vol. 60, no. 5, pp. 376–389, Aug. 2025, doi: 10.1177/1478422X241298181.

[5] R. Zeszut, D. C. Hansen, D. Borth, R. J. Santucci, and C. Sanders, "Differences in Atmospheric Corrosion Severity Over Long and Short Distances," Corrosion, vol. 80, no. 8, pp. 783–795, Aug. 2024, doi: 10.5006/4507.

[6] N. LeBozec and D. Thierry, "Corrosion Performance of Prepainted Galvanized Steel After 8-Year Outdoor Exposure Upon the Distance to the Seashore in Temperate Environment," Materials and Corrosion, Feb. 2026, doi: 10.1002/maco.70115.

[7] INEGI, "Geografía y Medio Ambiente." Accessed: May 04, 2026. [Online]. Available: https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/

[8] B. Borah, H. B. Kaushik, and V. Singhal, "Analysis and Design of Confined Masonry Structures: Review and Future Research Directions," Buildings, vol. 13, no. 5, p. 1282, May 2023, doi: 10.3390/buildings13051282.

[9] H. A. Velasquez, Á. Hurtado, D. Soto, and C. Angel, "Impact of structural degradation on the seismic resilience of self-built housing: an approach based on intelligent circular resilience," Journal of Building Pathology and Rehabilitation, vol. 10, no. 2, p. 123, Dec. 2025, doi: 10.1007/s41024-025-00633-5.

[10] Q. Yuan, J. Zhang, Z. Huang, Z. Zhang, X. Wang, and B. Li, "Deposition and accumulation of marine aerosol and its penetration into concretes exposed to the marine atmospheric zone: an overview," Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 23, no. 1, p. 65, Jan. 2023, doi: 10.1007/s43452-022-00599-y.

[11] C. Kassinis, L. Aresti, M. Koronides, P. Christodoulides, C. Michailides, and T. Onoufriou, "A review on the environment's influence on coastal marine steel corrosion and in-situ monitoring," Journal of Materials Science: Materials in Engineering, vol. 20, no. 1, p. 125, Oct. 2025, doi: 10.1186/s40712-025-00352-2.

[12] O. Trocónis de Rincón, A. Romero de Carruyo, C. Andrade, P. R. L. Helene e I. Díaz, Eds., Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. Maracaibo, Venezuela: Universidad del Zulia / CYTED, 2006

[13] H. Su, W. Liu, and X. Yao, "Effects of Gradient Marine Atmospheric Exposure on Mechanical Properties and Residual Stress of 2A14 Aluminum Alloy Tungsten Inert Gas-Welded

ISSN: 2594-1925

Joints," J. Mater. Eng. Perform., vol. 35, no. 27, pp. 27506–27517, Jul. 2026, doi: 10.1007/s11665-026-13725-1.
[14] Q. Yuan, J. Zhang, Z. Huang, Z. Zhang, X. Wang, and B. Li, "Deposition and accumulation of marine aerosol and its penetration into concretes exposed to the marine atmospheric zone: an overview," Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 23, no. 1, p. 65, Jan. 2023, doi: 10.1007/s43452-022-00599-y.
[15] NMX–C-515-ONNCCE-2016, "Industria de la construcción–Concreto Hidráulico-Durabilidad–Determinación de la profundidad de carbonatación en concreto hidráulico–Especificaciones y método de ensayo," Diario Oficial de la Federación Mexicana. Accessed: May 18, 2024. [Online]. Available: https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6182/seeco11_C/seeco11_C.html
[16] K. L. Ackerman, A. D. Nugent, and C. Taing, "Mechanisms controlling giant sea salt aerosol size distributions along a tropical orographic coastline," Atmos. Chem. Phys., vol. 23, no. 21, pp. 13735–13753, Nov. 2023, doi: 10.5194/acp-23-13735-2023.
[17] L. Xiang, Q. Meng, and P. Ren, "Effects of environmental and architectural factors on chloride-salt deposition on coastal building surfaces in the Zhujiang River Estuary," Build. Environ., vol. 242, p. 110554, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110554.
[18] H. İ. Şenol, "Coastal erosion and stream flow dynamics: historical analysis and forecasting shoreline changes in the Yeşilırmak delta," Environ. Earth Sci., vol. 84, no. 19, p. 543, Oct. 2025, doi: 10.1007/s12665-025-12537-1.
[19] L. Ahmad, A. Biswas, J. Warland, and I. Anjum, Climate Change and Agrometeorology. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. doi: 10.1007/978-981-99-4863-5.
[20] R. E. Melchers, "Corrosion at the Steel–Medium Interface," Corrosion and Materials Degradation, vol. 5, no. 1, pp. 52–72, Jan. 2024, doi: 10.3390/cmd5010003.
[21] ASTM C805/C805M-25, "Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete," Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete. Accessed: Sep. 28, 2026. [Online]. Available: https://store.astm.org/c0805_c0805m-25.html
[22] NMX-C-155-ONNCCE-2014, "Industria de la construcción-concreto hidráulico-dosificado en masa especificaciones y métodos de ensayo (cancela a la nmx-c-155-onncce-2004 y a la nmx -c-403-onncce-1999).," Organismo Nacional de Normalización. Accessed: Sep. 28, 2026. [Online]. Available: https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nmx-c-155-onncce-2014/
[23] M. O. Osta, A. Azeem, S. Rashid, M. Harun, and A. Hanif, "Marine Resilience: Understanding the Durability and Effects on Concrete Structures—A Comprehensive Review," Arab. J. Sci. Eng., vol. 51, no. 4, pp. 3981–4006, Feb. 2026, doi: 10.1007/s13369-025-10697-7.
[24] G. Vizentin and G. Vukelic, "Prediction of the Deterioration of FRP Composite Properties Induced by Marine Environments," J. Mar. Sci. Eng., vol. 10, no. 4, p. 510, Apr. 2022, doi: 10.3390/jmse10040510.
[25] R. Zhao, C. Li, and X. Guan, "Advances in Modeling Surface Chloride Concentrations in Concrete Serving in the Marine Environment: A Mini Review," Buildings, vol. 14, no. 6, p. 1879, Jun. 2024, doi: 10.3390/buildings14061879.

ISSN: 2594-1925

Derechos de Autor (c) 2026 Kenson Noel, David Reyes-González, Rodrigo Vivar-Ocampo

Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0.

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato — y adaptar el documento — remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Resumen de licencia - Texto completo de la licencia

ISSN: 2594-1925